

УДК 621.965.02

П. В. БОРОВИК**ЗАДАЧА ОПТИМІЗАЦІЇ ПРОФІЛЮВАННЯ ФАСОННОГО НОЖА**

Проаналізовано переваги та недоліки процесу гарячого поділу безперервнолітої квадратної заготовки на ножицях з фасонними ножами. Відзначається доцільність проведення теоретичних досліджень розділових операцій на ножицях з використанням методу скінченних елементів (МСЕ). Метою даної роботи було визначення оптимальної форми профілювання фасонного ножа для поділу квадратної заготовки в гарячому стані шляхом математичного моделювання на базі МСЕ. Представлено методику проведення досліджень, що включали два етапи. На першому етапі використовували математичне моделювання відповідно до плану повного факторного експерименту 24 згідно виробничих умов реалізації процесу з ножами що мали значення кута розкриття ножів $90...98^\circ$ та ухилу контактних поверхонь $3...11^\circ$. При обробці даних моделювання були отримані три відносних параметра, два з яких характеризують зминання (затяжка) і загин кінців розкату, і ще один – ромбічність торцевої поверхні. Для кожного з параметрів, отримані лінійні рівняння регресії як функція температури різання та розмірів заготовок, величини кута розкриття ножів та ухилу контактних поверхонь. На другому етапі дослідження вирішували оптимізаційну задачу пошуку мінімуму цільової функції – ромбічності. За результатами відзначено, що оптимальні значення профілювання ножів залежать від вимог, що висуваються до якості зрізу. Введено фактор граничного відхилення зминання і загину кінців, встановлений діапазон його значень та проаналізовано вплив на оптимальні параметри. Запропоновано величини кута розкриття ножів та ухилу контактних поверхонь, за умови мінімізації граничного відхилення зминання і загину кінців у досліджуваних діапазонах температур та розмірів заготовок. Отримано залежності параметрів профілювання ножів від граничного відхилення зминання і загину кінців заготовок після поділу. Результати роботи можуть бути рекомендовані для використання при прийнятті проектно-конструкторських і технологічних рішень в питаннях гарячого розділення безперервнолітої квадратної заготовки фасонними ножами на кут.

Ключові слова: фасонний ніж, якість поділу квадратної заготовки, ножиці, математична модель.

П. В. БОРОВИК**ЗАДАЧА ОПТИМИЗАЦИИ ПРОФИЛИРОВКИ ФАСОННОГО НОЖА**

Проанализированы преимущества и недостатки процесса горячего разделения непрерывнолитой квадратной заготовки на ножницах с фасонными ножами. Отмечается целесообразность проведения теоретических исследований разделительных операций на ножницах с использованием метода конечных элементов (МКЭ). Целью данной работы было определение оптимальной формы профилировки фасонного ножа для разделения квадратной заготовки в горячем состоянии путем математического моделирования на базе МКЭ. Представлена методика проведения исследований, состоявших из двух этапов. На первом этапе использовали математическое моделирование в соответствии с планом полного факторного эксперимента 24 согласно производственных условий реализации процесса ножами, имевшими угол раскрытия ножей $90...98^\circ$ и наклон контактных поверхностей $3...11^\circ$. При обработке результатов моделирования были получены три относительных параметра, два из которых характеризуют смятие (затяжка) и загиб концов раската, и еще один – ромбичность торцевой поверхности. Для каждого из параметров, полученные линейные уравнения регрессии как функция температуры резки и размеров заготовок, величины угла раскрытия ножей и уклона контактных поверхностей. На втором этапе исследования решали оптимизационную задачу поиска минимума целевой функции – ромбичности. По результатам отмечено, что оптимальные значения профилирования ножей зависят от требований, предъявляемых к качеству среза. Введен фактор предельного отклонения смятия и изгиба концов, установлен диапазон его значений и проанализировано влияние на оптимальные параметры. Предложены величины угла раскрытия ножей и уклона контактных поверхностей, при условии минимизации предельного отклонения смятия и изгиба концов в исследуемых диапазонах температур и размеров заготовок. Получены зависимости оптимальных параметров профилировки ножей от предельного отклонения смятия и изгиба концов заготовок после разделения. Результаты работы могут быть рекомендованы для использования при принятии проектно-конструкторских и технологических решений в вопросах горячего разделения непрерывнолитой квадратной заготовки фасонными ножами на угол.

Ключевые слова: фасонный нож, качество разделения квадратной заготовки, ножницы, математическая модель.

P. V. BOROVIK**THE OPTIMIZATION PROBLEM OF THE SHAPED KNIFE PROFILING**

The advantages and disadvantages of the process of separation in hot condition of billet with square shape by special profiled knives were analyzed. There is expediency of carrying out theoretical researches the separating operations by shears based on finite elements method (FEM) is noted. The purpose of the work was to determine the optimal shape for make form a profiled knife for separating a square billet in a hot state by simulating based on the FEM. A methodology of study realization consisting of two stages is presented. At the first stage, simulating was used in accordance with the plan of the full factorial experiment 24 according to the technological environment for the process implementation with knives having a knife opening angle of $90...98^\circ$ and a contact surface inclination of $3...11^\circ$. At the processing the simulation results, three relative parameters were obtained. Two parameters characterize the crumpling (tightening) and bending of the billet ends, and one more – the rhomboidity of the end surface. For each of the parameters, the linear regression equations obtained as a function of cutting temperature and billet sizes, the knife opening angle and contact surface inclination. At the second stage of the study, the optimization problem of determining the minimum of the objective function – rhomboidity – was solved. According to the results, it was noted that the optimal values of the profiling of knives depend on the requirements for the quality of the cut. The factor of the maximum deviation of crumpling and bending of the ends is introduced. The range of its values is established and the influence on the optimal parameters is analyzed. The values of the knife opening angle and contact surface inclination are proposed, provided that the maximum deviation of the crumpling and bending of the ends, at the studied temperature ranges and sizes of the billets, is minimized. The dependences of the optimal parameters of the profiling of knives on the maximum deviation of the crumpling and bending of the ends of the billets after separation are obtained. Results of work can be recommended for use to get solutions in design and technology questions of hot separation square billet by profiled knife on the angle.

Keywords: profiled knives, the quality of the separation of a square billet, shears, a mathematical model

Вступ. Процеси поділу металопрокату на мірні довжини є невід'ємною складовою технологій виробництва прокатної продукції, а також в умовах виготовлення безперервнолитих заготовок. Для реалізації процесу поділу досить широко використовують ножиці різноманітних конструкцій [1, 2]. Як відомо з практики, розділові операції, здатні робити істотний вплив не тільки на якість готового металопрокату, а й на ефективність реалізації наступних технологічних операцій. На сучасному етапі розвитку металургійного машинобудування ефективне вирішення такого типу задач можливе за умови підвищення точності вироблених конструкторських розрахунків і збільшення ступеня наукової обґрунтованості при прийнятті проектно-конструкторських і технологічних рішень.

Аналіз стану питання. У практиці виробництва сортового металопрокату та безперервнолитих заготовок до нього застосовують операції поперечного поділу, зокрема на ножицях [1, 2]. При цьому підвищення вимог до якості готової продукції і прагнення розширити технологічні можливості ножиць сприяють підвищенню інтересу в даній області [3, 4].

До основних переваг процесу поділу металу на ножицях слід віднести: безвідходність і високу (у порівнянні з газовим різанням) швидкість різання, а також високу точність і якість зрізу. Це, в свою чергу, сприяє розширенню можливих технологічних схем, в яких виробники металургійних машин віддають перевагу саме застосуванню ножиць. Так один з найбільших в Україні і світі заводів важкого машинобудування ПАТ «Новокраматорський машинобудівний завод» пропонує на машинах безперервного лиття сортових заготовок (МБЛЗ), процес поперечного різання заготовки на мірні довжини, здійснювати за допомогою летючих гідравлічних ножиць оригінальної конструкції (рис. 1). З урахуванням специфіки розроблених сортових МБЛЗ, що мають розливають заготовки перерізом від 100×100 до 150×150 мм, різання здійснюється профільованими ножами, що рухаються під кутом 45° до горизонтальної площини.

Дана конструкція ножиць дозволяє розрізати заготовки з максимальним перерізом 150×150 мм при температурі не нижче 800°C зі швидкістю до 70 мм/с і максимальною силою різання 2,4 МН.

Відмінною особливістю ножів в ножицях даної конструкції є той факт, що кут розкриття ножів трикутної форми (див. рис. 1, б) становить $\alpha = 94^\circ$, а ухил контактних поверхонь – $\beta = 7^\circ$. Це дозволяє знизити силу різання і підвищити якість зрізу.

При цьому якість поділу має задовольняти основним вимогам, що пред'являються до сортового прокату, зокрема [5]: забезпечення заданої точності по довжині; формування прямого зрізу; мінімізація зминання (затяжка) кінців заготовки та явища задирок.

Точність поперечного різання сортового прокату і допустима величина косини зрізу, а також методи контролю відхилення форми металопродукції (в

деяких країнах колишнього СРСР, в тому числі і в Україні), регламентуються рядом нормативних документів [5–8].

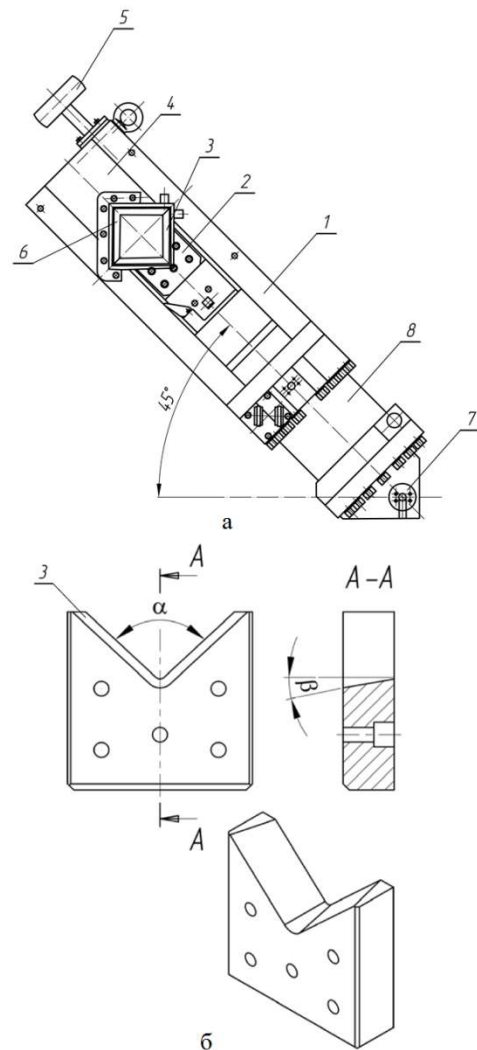


Рис. 1 – Загальний вигляд (а) ножиць летючих гідравлічних конструкції НКМЗ для поперечної гарячого різання на мірні довжини безперервно-литих квадратних заготовок і профілювання ножа (б): 1 – станина; 2, 4 – нижній і верхній супорт; 3, 6 – ножі; 5 – верхній ролик; 7 – циліндрична напрямна; 8 – гідроциліндр механізму різання

Якість різання сортової заготовки характеризується такими дефектами як задирки (або завал кромки) і зминання (затяжка) кінців розкату [9]. Очевидно, що при оптимальному профілюванні ножів можна домогтися задоволення вимог до якості різання, знизити показники браку і підвищити вихід придатного металопрокату.

Крім того, з огляду на те, що квадратна заготовка на даних ножицях ріжеться по діагоналі, ще одним показником якості різання є ромбічність поверхні зрізу, яка проявляється у вигляді викривлення геометричної форми поперечного перерізу і відхиляється від вихідної квадратної за рахунок різниці діагоналей. Величина ромбічності має істотне значення для подальшої прокатки заготовок, оскільки від цього залежить їх самовстановлення в калібрі.

Для визначення оптимальної форми профілювання ножа логічним є проведення експериментальних досліджень, проте такий підхід пов'язаний з цілою низкою організаційних і фінансових труднощів. З огляду на можливості сучасної обчислювальної техніки, а також розвиток методів математичного моделювання, доцільно зміщувати акценти в бік теоретичних досліджень процесів обробки металів тиском [10], що, в першу чергу, відноситься до методу скінченних елементів (МСЕ). Цей метод дозволяє значно розширити уявлення про протікання процесів і підвищити ступінь наукової обґрунтованості при прийнятті технологічних і конструктивних рішень. Так в роботах [11, 12] представлена тривимірна математична модель процесу поперечного розділення на ножицях безперервнолитих сортових заготовок в гарячому стані, котра дозволяє адекватно відображати енергосилові і геометричні параметри процесу і найбільш повно врахувати геометричні особливості ріжучого інструменту. При цьому в роботі [12] запропоновано параметри профілювання ножа, але за умов різання заготовки перерізом 120×120 мм при температурі 970°C зі швидкістю 70 мм/с, котрі вочевидь не є оптимальними, оскільки не задовольняють весь реальний діапазон товщин та температур реалізації процесу різання.

Мета роботи. Визначення оптимальної форми профілювання фасонного ножа для поділу квадратної заготовки в гарячому стані шляхом математичного моделювання на базі методу скінченних елементів.

Методика досліджень. Досягнення зазначеної мети здійснювали на тривимірній математичній моделі процесу поперечного поділу на ножицях безперервнолитих сортових заготовок в гарячому стані [11, 12]. Безпосередньо дослідження проводили в два етапи.

На першому етапі, беручи до уваги результати отримані в роботі [12] та використовуючи відомі підходи до планування експерименту [13, 14], був використаний повний факторний план 2^4 і отримані результати моделювання процесу поділу квадратної заготовки в гарячому стані.

Рівні варіювання факторів при реалізації моделювання процесу поділу квадратної заготовки в гарячому стані профільованими ножами обирались відповідно до виробничих умов та наведені у табл. 1.

Таблиця 1. Рівні варіювання факторів при реалізації моделювання процесу поділу квадратної заготовки в гарячому стані профільованими ножами

№	Найменування параметру	Фактори	Одиниці вимірювання	Рівні варіювання	
				min	max
1	Температура	T	°C	800	1000
2	Розмір квадрату	h	мм	100	150
3	Кут розкриття ножів	α	градус	90	98
4	Ухил контактних поверхонь	β	градус	3	11

В результаті були отримані профілі форми торцевої поверхні заготовки після розділення, які підтверджують, що її формоутворення істотно залежить від конфігурації ножа та умов реалізації процесу.

При обробці отриманих результатів моделювання проводилися заміри геометричних параметрів торцевої поверхні після різання за схемою, що представлена на рис. 2.

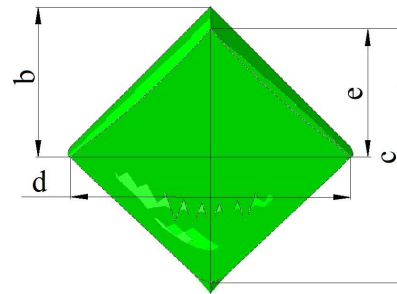


Рис. 2 – Схема вимірів геометричних параметрів торцевої поверхні заготовки після розділення на ножицях

За результатами замірів були розраховані три відносних параметра форми, два з яких характеризують зминання і загин кінців заготовки k_b і k_e , а ще один – ромбічність k_d торцевої поверхні:

$$k_b = \frac{b}{\sqrt{2}h}; \quad (1)$$

$$k_e = \frac{e}{c}; \quad (2)$$

$$k_d = \frac{d}{c}; \quad (3)$$

де $\sqrt{2}h$ – вихідна діагональ квадратної заготовки зі стороною h .

В ході обробки результатів для вказаних відносних параметрів були отримані лінійні регресійні рівняння як функція 4-х параметрів (див. табл. 1).

На другому етапі дослідження вирішували оптимізаційну задачу пошуку мінімуму цільової функції:

$$F(\alpha, \beta) = \max[k_d] = \max \begin{cases} k_d(T_{\min}, h_{\min}, \alpha, \beta) \\ k_d(T_{\min}, h_{\max}, \alpha, \beta) \\ k_d(T_{\max}, h_{\min}, \alpha, \beta) \\ k_d(T_{\max}, h_{\max}, \alpha, \beta) \end{cases} \quad (4)$$

З накладанням обмежень:

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha_{\min} \leq \alpha \leq \alpha_{\max} \\ \beta_{\min} \leq \beta \leq \beta_{\max} \\ \max([k_e], [k_b]) \leq 0,5(1 + \Delta) \\ \min([k_e], [k_b]) \geq 0,5(1 - \Delta) \end{array} \right\}, \quad (5)$$

де Δ – граничне відхилення зминання і загину кінців (параметри k_b і k_e).

Для вирішення задачі пошуку оптимальних значень α та β використовували метод узагальненого приведенного градієнта, шляхом використання надбудови «Пошук рішення» в Excel [15].

Результати моделювання. За результатами планованого експерименту розмах значень відносних параметрів форми склав: $k_b = 0,458 \dots 0,541$; $k_e = 0,456 \dots 0,523$; $k_d = 1,091 \dots 1,182$.

Вирішення задачі оптимізації залежить від вимог, що висуваються до форми кінця заготовки після різання, насамперед від граничного відхилення Δ параметрів k_b і k_e .

На рис. 3 представлені залежності значень кутів α (рис. 3, а) та β (рис. 3, б) профілювання ножів, а на рис. 4 залежності мінімальних і максимальних значень відносних параметрів форми k_d (рис. 4, а), k_b і k_e (рис. 4, б) від граничного відхилення Δ .

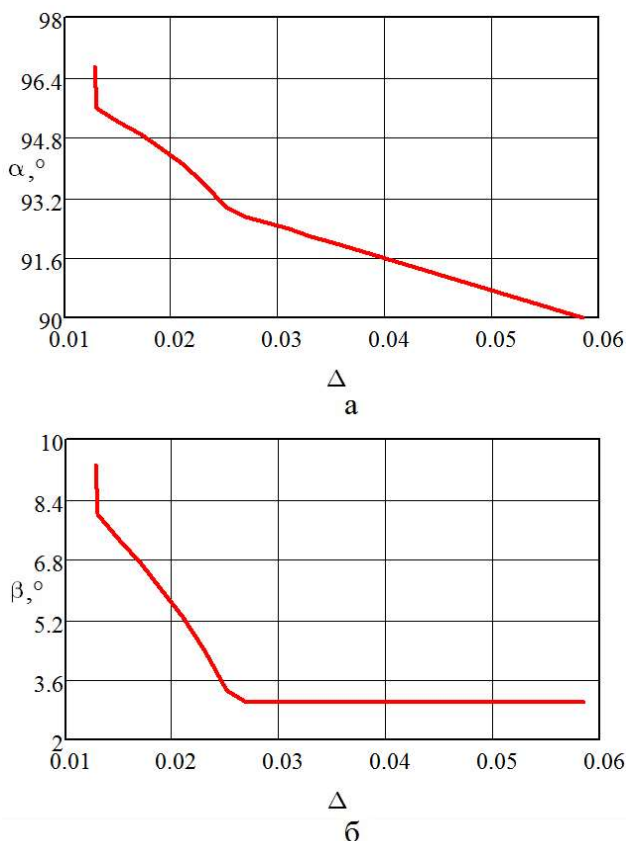


Рис. 3 – Залежності оптимальних значень кутів: а – α та б – β профілювання ножів від граничного відхилення зминання і загину кінців Δ

Як можна бачити з приведених графіків, в досліджуваному діапазоні параметрів (див. табл. 1), на оптимальне рішення має суттєвий вплив величина граничного відхилення зминання і загину кінців в межах $\Delta = 0,0128 \dots 0,0585$. При цьому подальше зменшення Δ не дозволяє знайти оптимального рішення, а подальше збільшення не має сенсу, оскільки кут розкриття ножів α та ухил контактних поверхонь β сягають своїх мінімальних значень.

Крім того, слід зазначити, що β приймає мінімальне значення вже при $\Delta = 0,0258$ (див. рис. 3, б), чим і пояснюються зміни в поведінці α (див. рис. 3, а), k_d (див. рис. 4, а) та k_b (див. рис. 4, б).

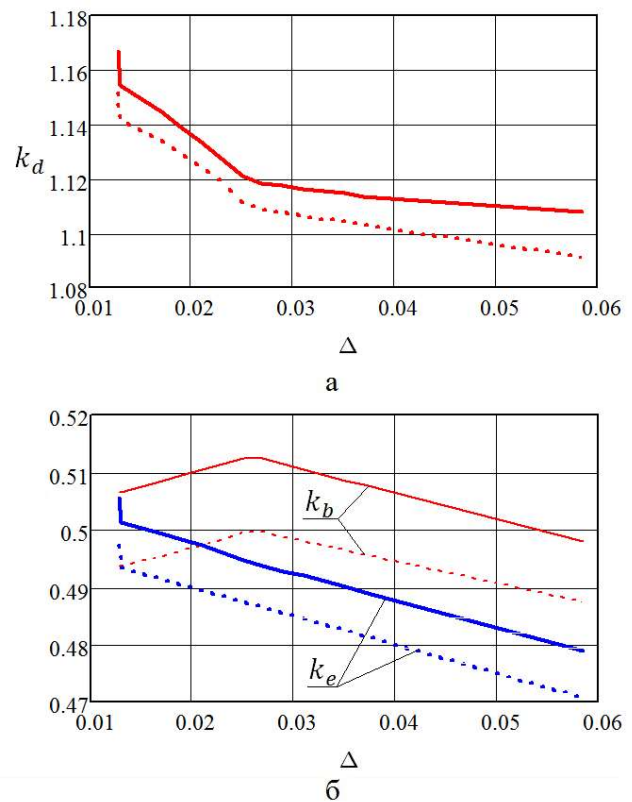


Рис. 4. Залежності мінімальних (---) і максимальних (—) значень відносних параметрів форми k_d (а), k_b і k_e (б) від граничного відхилення зминання і загину кінців Δ

В доповнення слід звернути увагу на різкий стрибок всіх показників при зменшенні Δ з 0,0129 до 0,0128, що пояснюється досягненням мінімально можливого значення Δ .

Вочевидь, за умови мінімізації граничного відхилення зминання і загину кінців та дотримання вказаних вище діапазону температур T та розмірів заготовок h , оптимальними значеннями слід вважати $\alpha = 95,58^\circ$ та $\beta = 8,04^\circ$. Проте, у разі, якщо вимоги до граничного відхилення Δ , можуть бути пом'якшені, або умови реалізації процесу змінені, то і оптимальні значення мають бути змінені відповідно.

Висновки. За результатами роботи можна зробити наступні висновки:

- процес поділу металу на ножицях слід вважати більш ефективним з точки зору більш високої швидкості реалізації процесу та мінімізації відходів, а також за рахунок точності і якості зрізу в порівнянні з іншими способами;

- підвищення ступеня наукової обґрунтованості при прийнятті технологічних і конструктивних рішень процесів поділу на ножицях можливе за умови застосування математичного моделювання на базі методу скінченних елементів;

- отримані рівняння регресії основних показників якості поділу безперервнолитої гарячої квадратної

заготовки фасонними ножами на кут, які дозволяють обґрунтувати кути розкриття та ухилу контактних поверхонь ножів, що забезпечують необхідні вимоги до якості різки, з урахуванням умов реалізації процесу;

– в досліджуваному діапазоні параметрів, на оптимальне рішення має суттєвий вплив величина граничного відхилення змінання і загину кінців в межах $\Delta = 0,0128 \dots 0,0585$;

– за умови мінімізації граничного відхилення змінання і загину кінців у вказаних діапазонах температур та розмірів заготовок, оптимальними слід вважати кут розкриття ножів $95,58^\circ$ та ухил контактних поверхонь $8,04^\circ$;

– у разі, якщо вимоги до граничного відхилення, можуть бути пом'якшені, або умови реалізації процесу змінені, то і оптимальні значення мають бути змінені відповідно.

Результати роботи можуть бути рекомендовані для використання при прийнятті проектно-конструкторських і технологічних рішень в питаннях поділу безперервнолітої квадратної заготовки в гарячому стані фасонними ножами на кут.

Список літератури:

1. Siddhartha Ray. Principles and Applications of Metal Rolling. Cambridge University Press, 2016. 320 p.
2. Лукашин Н. Д. Конструкция и расчет машин и агрегатов металлургических заводов: учебник для вузов / Н. Д. Лукашин, Л. С. Кохан, А. М. Якушев – М.: ИКЦ «Академкнига», 2003. – 456 с.: ил.
3. Куваев В. М. Модель розрізання прокату барабанными летючими ножами / В. М. Куваев, Н.О. Новодранова // Теория и практика металлургии. – Днепр, 2017. – № 1-2 (108-109) – С. 67–70.
4. Поляков Б. Н. Новый способ резания на ножницах заготовочных прокатных станов / Б. Н. Поляков // Сталь. – М., 2016. – №1 – С. 36–38.
5. Прокат сортовой і фасонний із сталі вуглецевої звичайної якості. Загальні технічні умови : ДСТУ 4484:2005 / ГОСТ 535-2005. – Чинний від 2005-11-25. – К. : Держспоживстандарт України, 2005. – 14 с. – (Держспоживстандарт України).
6. Прокат сортовой сталевой горячекатаный квадратный. Сортамент : ДСТУ 4746:2007 / ГОСТ 2591-2006. – Чинний від 2007-02-26. – К. : Держспоживстандарт України, 2007. – 6 с. – (Держспоживстандарт України).
7. ГОСТ 8559-75 Сталь калиброванная квадратная. Сортамент. – Введ. 1976-01-01. – М. : Госстандарт СССР, 1975. – 5 с. – (Государственный комитет СССР по управлению качеством продукции и стандартам).
8. Металлопродукція. Методи вимірювання відхилів форми : ДСТУ 6026:2008 / ГОСТ 26877-2008. – Чинний від 2013-01-01. – К. : Держспоживстандарт України, 2008. – 23 с. – (Держспоживстандарт України).
9. ГОСТ 21014-88. Прокат черных металлов. Термины и определения дефектов поверхности. – Введ. 1990-01-01. – М. : Госстандарт СССР, 1989. – 60 с. – (Государственный комитет СССР по управлению качеством продукции и стандартам).
10. Боровик П. В. Теоретичні дослідження процесів обробки металів тиском на основі методу скінчених елементів: Навч. посіб. / П. В. Боровик. – Алчевськ: ДонДТУ, 2012. – 170 с.
11. Боровик П. В. 3D модель процесса поперечного разделения на ножницах непрерывнолитых сортовых заготовок / П. В. Боровик, П. А. Петров // Сборник научных трудов ДонДТУ. – Алчевск, 2013. – Вып. 41. – С. 151–155.
12. Боровик П. В. Обоснование профилировки фасонного ножа для разделения квадратной заготовки в горячем состоянии / П. В. Боровик // Обработка материалов давлением. – 2019. – № 1. – С. 179–185.
13. Оптимальные планирования эксперименту при дослідженні технологічних процесів, приладів і систем: навч. посіб. / М. Д. Кошовий, О. М. Костенко, О. В. Заболотний та ін. – Х.: Нац. аерокосм. ун-т «Харк. авіац. ін-т», 2010. – 161 с.
14. Кузьмичов А. І. Оптимізаційні методи і моделі: практикум в Excel: навч. посіб. / А. І. Кузьмичов – К.: ВПЦ АМУ, 2013. – 438 с.

References (transliterated)

1. Siddhartha Ray. Principles and Applications of Metal Rolling. Cambridge University Press, 2016. – 320 p.
2. Lukashin N. D. Konstrukcija i raschet mashin i agregatov metallurgicheskikh zavodov: uchebnik dlja vuzov / N. D. Lukashin, L. S. Kohan, A. M. Jakushev – Moscow: IKC «Akademkniga», 2003. – 456 p.: il.
3. Kuvayev V. M. Model' rozrizannya prokatu barabanny'my' letyuchy'my' nozhy'cyamy' / V. M. Kuvayev, N.O. Novodranova // Teoriya i praktika metallurgii. – Dnepr, 2017. – No 1-2 (108-109) – P. 67–70.
4. Poljakov B. N. Novyj sposob rezaniya na nozhnicah zagotovochnyh prokatnyh stanov / B. N. Poljakov // Stal'. – Kiev : 2016. – No1 – P. 36–38.
5. Prokat sortovy'j i fasonny'j iz stali vuglecevoyi zvy'chajnoyi yakosti. Zagal'ni texnichni umovy' : DSTU 4484:2005 / GOST 535-2005. – Chy'nny'j vid 2005-11-25. – Kiev : Derzhspozhy'vstandart Ukrainy, 2005. – 14 p. – (Derzhspozhy'vstandart Ukrainy).
6. Prokat sortovy'j stalevy'j garyachekatany'j kvadratny'j. Sortament : DSTU 4746:2007 / GOST 2591-2006. – Chy'nny'j vid 2007-02-26. – Kiev : Derzhspozhy'vstandart Ukrainy, 2007. – 6 p. – (Derzhspozhy'vstandart Ukrainy).
7. GOST 8559-75 Stal' kalibrovannaja kvadratnaja. Sortament. – Vved. 1976-01-01. – Moscow : Gosstandart SSSR, 1975. – 5 p. – (Gosudarstvennyj komitet SSSR po upravleniju kachestvom produkcii i standartam).
8. Metaloprodukcija. Metody' vy'miryuvannya vidxy'liv formy' : DSTU 6026:2008 / GOST 26877-2008. – Chy'nny'j vid 2013-01-01. – Kiev : Derzhspozhy'vstandart Ukrainy, 2008. – 23 p. – (Derzhspozhy'vstandart Ukrainy).
9. GOST 21014-88. Prokat chernyh metallov. Terminy i opredelenija defektov poverhnosti. – Vved. 1990-01-01. – Moscow : Gosstandart SSSR, 1989. – 60 p. – (Gosudarstvennyj komitet SSSR po upravleniju kachestvom produkcii i standartam).
10. Borovik P. V. Teorety'chni doslidzhennya procesiv obrobky' metaliv ty'skom na osnovi metodu skincheny'x elementiv: navch. posib. / P. V. Borovik. – Alchevs'k: DonDTU, 2012. – 170 p.
11. Borovik P. V. 3D model' processa poperechnogo razdeleniya na nozhnicah nepreryvno litih sortovyh zagotovok / P. V. Borovik, P. A. Petrov // Sbornik nauchnyh trudov DonGTU. – Alchevsk, 2013. – Vyp. 41. – P. 151–155.
12. Borovik P. V. Obosnovanie profilirovki fasonnogo nozha dlja razdeleniya kvadratnoj zagotovki v gorjachem sostojanii / P. V. Borovik // Obrabotka materialov davleniem. – 2019. – No 1. – P. 179–185.
13. Opty'mal'ne planuvannya ekspery'mentu pry' doslidzhenni tehnologichny'x procesiv, pry'ladiv i sy'stem: navch. posib. / M. D. Koshovy'j, O. M. Kostenko, O. V. Zabolotny'j ta in. – Kharkiv.: Nacz. aerokosm. un-t «Khark. aviacz. in-b», 2010. – 161 p.
14. Kuz'my'chov A. I. Opty'mizacijni metody' i modeli: prakty'kum v Excel: Navch. posib. / A. I. Kuzmy'chov – Kiev : VPCz AMU, 2013. – 438 p.

Надійшла (received) 10.11.2019

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Боровик Павло Володимирович (Боровик Павел Владимирович, Borovik Pavlo Volodymyrovych) – кандидат технічних наук, доцент, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, доцент кафедри «Машинознавство та обладнання промислових підприємств»; м. Северодонецьк, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5353-2022>; e-mail: borovikpv@ukr.net.